

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Святненко Андрій Олегович

УДК 681.8

ЦИЛІНДРИЧНІ П'ЄЗОКЕРАМІЧНІ ВИПРОМІНЮВАЧІ З
ВНУТРІШНІМИ ЕКРАНАМИ

Спеціальність 05.09.08 – прикладна акустика та звукотехніка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі акустики та акустoeлектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор

Лейко Олександр Григорович

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського» (м. Київ), професор кафедри акустики та
акустoeлектроніки.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор

Мислович Михайло Володимирович

Інститут електродинаміки Національної академії наук
України (м. Київ), завідувач відділом теоретичної
електротехніки

– кандидат технічних наук, доцент

Мелешко Микола Андрійович,

Національний авіаційний університет, професор
кафебри комп'ютерних мультимедійних технологій

Захист відбудеться « » березня 2020 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.19 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37, корпус 12, аудиторія 412.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «17» лютого 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.Б. Швайченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування теми дослідження. Циліндричні п'єзокерамічні випромінювачі знайшли широке застосування в практичній гідроакустиці. Це пов'язано з їх значною ефективністю як перетворювачів електричної енергії в акустичну у зв'язку з великим об'ємом п'єзокераміки у складі їх конструкцій. В той же час при формуванні ними акустичних полів в оточуючому середовищі цим випромінювачам притаманний суттєвий недолік необхідність введення до складу їх конструкцій акустичних екранів. Такі екрани можуть розміщуватись як ззовні п'єзокерамічної оболонки випромінювача, так і всередині її. При зовнішньому розміщенні екранів суттєво збільшуються, особливо на низьких частотах, габаритні розміри випромінювачів, що значно звужує можливості їх застосування. При внутрішньому розміщенні екранів ця проблема зникає, завдяки чому дослідження таких випромінювачів стає дуже актуальним.

Дослідженням властивостей циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з зовнішніми екранами присвячено багато робіт. В роботах Грінченка В.Т., Вовка І.В. основний акцент було зроблено на виконанні такими випромінювачами функції формування акустичних полів в оточуючих середовища і впливу на них акустичної взаємодії між елементами конструкцій випромінювачів з зовнішніми екранами.

Із аналізу фізичних умов функціонування циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми екранами зрозуміло, що подібні процеси зв'язаності фізичних полів екранованого п'єзокерамічного випромінювача з внутрішнім екраном і зв'язаності процесів перетворення енергії і формування її акустичної частини в оточуючих середовищах мають місце і в цих випромінювачах.

Дослідженню їх механічних та акустичних полів при радіальній поляризації п'єзокерамічних оболонок випромінювачів присвячені роботи Грінченка В.Т., Вовка І.В., Маципури В.Т., Коцюби В.С., Меленка Ю.Я. В той же час систематизовані дослідження таких випромінювачів в залежності від впливу значного розмаїття особливостей їх конструктивного виконання відсутні. До таких особливостей відносяться: розміри екранів та п'єзокерамічних оболонок; їх взаємне розміщення між собою; склад п'єзокераміки оболонки та вид її поляризації; фізичні характеристики рідин, що заповнюють внутрішній об'єм оболонок. А саме результати таких досліджень і є базовими для виконання проектних робіт. Тому розробка розрахункового забезпечення проектування циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми акустичними екранами, в якому враховуються не тільки взаємодія названих вище трьох типів полів процесів при випромінюванні звуку, а і вплив на них конструктивних особливостей побудови випромінювачів, є актуальною для технічної гідроакустики.

Зв'язок з науковими планами, програмами, темами. Дисертаційна робота виконано на кафедрі акустики та акустоелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках держбюджетної НДР “Розробка неінвазійної пасивної акустичної системи нового покоління для вимірювання критичних фізіологічних параметрів головного мозку та внутрішнього вуха людини” (номер державної реєстрації - № 0118U003533)

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є створення теоретичних засад проектування випромінювачів з внутрішніми екранами з урахуванням зв'язаності фізичних полів в п'єзокераміці при перетворенні енергії, взаємодії елементів випромінювача при формуванні його акустичних полів і зв'язаності процесів перетворення енергії і формування акустичних полів. Це мета досягається шляхом розв'язку наступних завдань:

1. Розробка розрахункових моделей циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми екранами з урахуванням особливостей їх конструктивного виконання.

2. Розвиток підходів до розв'язку наскрізних задач випромінювання звуку циліндричними п'єзокерамічними випромінювачами з внутрішніми екранами з урахуванням всіх перерахованих вище зв'язаностей полів та процесів і визначення на їх основі аналітичних співвідношень для розрахунків всіх задіяних при випромінюванні звуку полів.

3. Систематизовані з єдиним методичних позицій дослідження властивостей фізичних полів циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми екранами в залежності від кількісних характеристик конструктивної реалізації цих випромінювачів.

4. Підтвердження адекватності запропонованих розрахункових моделей і отриманих чисельних результатів шляхом співставлення відповідних експериментальних і теоретичних даних.

5. Фізичне осмислення отриманих результатів і розробка на його основі конкретних пропозицій по проектуванню циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми екранами.

Об'єкт дослідження: процеси взаємодії полів різної фізичної природи при перетворенні енергії в циліндричному п'єзокерамічному випромінювачі з внутрішнім екраном і формуванні його акустичних полів.

Предмет дослідження: кругові циліндричні п'єзокерамічні випромінювачі з внутрішніми екранами.

Методи дослідження. При постановці і розв'язку задач стаціонарної гідроелектропружності використані методи зв'язаних полів в багатозв'язних областях та метод часткових областей. При одержанні чисельних результатів застосовані методи розв'язку нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Виконання експериментальних досліджень здійснено з використанням

методів вимірювання акустичних полів в заглушених вимірювальних гідроакустичних басейнах.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Запропоновані та експериментально підтверджені розрахункові моделі кругових циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми циліндричними екранами, що дозволяють врахувати при розв'язку задач випромінювання звуку взаємодію процесів перетворення енергії і формування полів та особливості побудови конструкцій випромінювачів.

2. В результаті розв'язку наскрізних задач випромінювання звуку циліндричними п'єзокерамічними випромінювачами з внутрішніми екранами вперше визначені аналітичні співвідношення для розрахунків електричних, механічних та акустичних полів з урахуванням зв'язаності всіх задіяних полів та процесів.

3. Створення єдиних методичних підходів до визначення полів різної фізичної природи вперше дозволило виконати систематизовані дослідження їх властивостей в залежності від кількісних характеристик конструкційних, фізичних і хвильових особливостей побудови циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми циліндричними екранами.

4. Врахування при випромінюванні звуку зв'язаності полів різної фізичної природи і процесів перетворення енергії і її формування в оточуючих середовища дозволило вперше встановити для досліджуваних випромінювачів :

втрату одномовності механічного поля циліндричного п'єзокерамічного випромінювача з внутрішнім екраном при радіально симетричному електричному збудженні його, набуття механічним полем багатомодовості коливань та визначення ефективності перерозподілу механічної енергії випромінювача між всіма модами;

збагачення спектру резонансних частот акустичного поля та його поширення без змін розмірів випромінювача в область частот, в 5÷7 разів менших резонансної частоти п'єзокерамічної оболонки випромінювача;

частотні закономірності поведінки електричного струму збудження досліджуваного випромінювача та його вхідних електричних опорів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. З'явилася можливість при виконанні проектних робіт знаходити найбільш раціональні рішення при побудові випромінювачів з внутрішніми екранами згідно із заданими вимогами;

2. З'явилася можливість ефективного випромінювання звуку екранованим випромінювачем без змін його розмірів на частотах, значно нижчих від тих, що практично реалізуються сьогодні;

3. З'явилися можливості пошуку шляхів ефективного узгодження випромінювачів із збуджуючими їх генераторами розрахунковими методами;

4. Результати дисертаційної роботи впроваджені в Державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів» при виконанні розрахунків звукових полів циліндричних випромінювачів по контракту №15DMAC/YZD589UA від 28.08.2015 р. з КНР, що підтверджується відповідним актом впровадження. Отримані результати використовуються в навчальному процесі НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» при підготовці технічних спеціалістів з акустики, зокрема, по дисциплінам «Електроакустичні перетворювачів» та «Акустичні антени».

Особистий внесок здобувача. В наукових працях [1-5], виконаних в співавторстві, здобувачу належать розробка та реалізація чисельних алгоритмів, систематизація чисельних результатів та участь в їх аналізі, постановка та проведення експериментальних досліджень. В патентах [5-6] здобувач приймав участь в проведенні патентних досліджень, розробці формули винаходу та оформленні матеріалів заявки.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі акустики та акустoeлектроніки факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під керівництвом доктора технічних наук, професора Лейко О.Г.

Робота є результатом самостійних досліджень Святненка А.О.

Апробація матеріалів дисертації. Положення та результати дисертації обговорювались на :

- Акустичний симпозіум «КОНСОНАНС - 2017», Київ, 2-3 жовтня 2017 року;
- Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка», Київ, 3-5 квітня 2018 року;
- Міжнародна науково-технічна конференція «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки», Київ, 15-18 грудня 2015 року;

Публікації. За темою дисертації опубліковано 10 наукових праць, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні іноземної держави, 4 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних), 2 патенти України на корисну модель, 3 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та об'єм дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 260 сторінок, у тому числі 160 сторінок основного тексту, 100 рисунків та списку використаних джерел із 128 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі відзначено актуальність теми дисертаційної роботи, напрямок, мету і задачі дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами. Викладено основні положення, які виносяться на захист, визначається наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, відомості про апробацію та публікацію основних результатів дисертаційної роботи, її обсяг і структуру, визначено особистий внесок здобувача та наведено інформацію щодо впровадження результатів роботи.

Перший розділ присвячено аналізу конструктивних особливостей циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми екранами, які необхідно врахувати при визначенні фізичних полів випромінювачів, їх відображення в розрахункових моделях. Наведено розв'язок задачі визначення фізичних полів циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми екранами з урахуванням їх конструктивних особливостей.

До конструктивних особливостей перетворювачів відносяться наступні конструктивні елементи: тип п'єзокерамічного матеріалу, з якого виконано активний елемент перетворювача, його поляризація та характер її організації; тип внутрішнього заповнення, що визначає тип конструкції перетворювача - силова або компенсована; фізичні характеристики заповнюючих рідин; середній радіус та товщина оболонки перетворювача.

Вибрана модель побудови такого перетворювача наведена на рис.1. Перетворювачі такого типу утворюються із трьох конструкційних елементів – п'єзокерамічної оболонки 1, акустичного екрану 2 і рідинного середовища 3.

Електроакустичні перетворювачі виконують дві функції – функцію перетворення одного виду енергії в інші і функцію формування акустичної енергії в оточуючих середовищах. В режимі випромінювання на вхід перетворювача подається електрична енергія, яка в п'єзокерамічній оболонці перетворюється в механічну. Остання через механічні коливання оболонки передається в оточуючі середовища у вигляді акустичної енергії. З допомогою внутрішнього екрану акустична енергія формується певним чином в оточуючих випромінювач середовищах.

Математично наведені особливості обох функцій перетворювача можливо врахувати сумісним розв'язком ряду диференціальних рівнянь, які описують відповідні процеси в перетворювачах. Процес перетворення електричної енергії в механічну описується рівняннями стану п'єзокераміки та електромеханічними коливаннями електропружної оболонки, якою є п'єзокерамічна оболонка. Процес збудження випромінювачем то поширення акустичних хвиль в середовищах, що оточують його, описується хвильовим рівнянням. Таким чином, в наскрізному вигляді задача випромінювання звуку досліджуванним перетворювачем описується трьома диференціальними рівняннями: стану п'єзокераміки

циліндричної оболонки, електропружних коливань цієї оболонки та хвильовими рівняннями поширення коливань в середовищах.

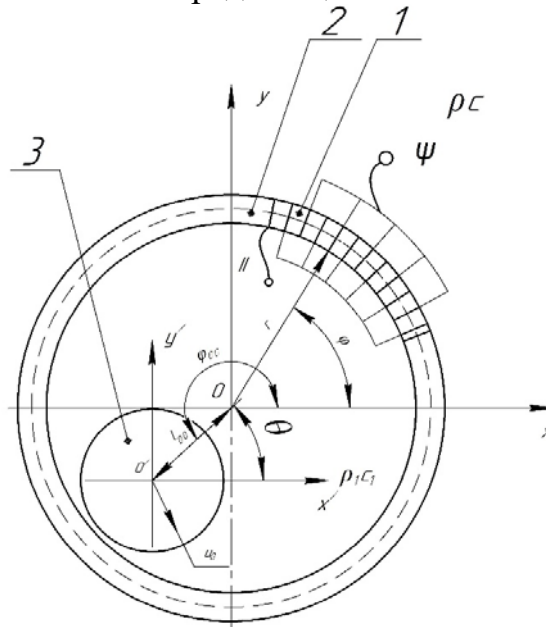


Рис. 1 Модель побудови п'єзокерамічного перетворювача з внутрішнім циліндричним екраном.

Для розв'язку сформульованої «наскрізної» задачі розробимо розрахункову модель циліндричного перетворювача з внутрішнім циліндричним екраном. За її основу приймемо фізичну модель, наведену на рис.1. Розрахункова модель включає п'єзокерамічну оболонку 1, акустичний екран 2, зовнішнє і внутрішнє 3 рідинні середовища і введені Декартові $OXYZ$ та $O_1X_1Y_1Z_1$ та кругові циліндричні r, φ, z та a, θ, z системи координат. Приймемо, що циліндрична оболонка та екран мають нескінченну довжину Цей вибір відповідає фізичній моделі досліджуваного перетворювача у випадках, коли його довжина перевищує (3-5) діаметрів перетворювача. Ця умова дозволяє розв'язувати задачу як плоску.

П'єзокерамічна оболонка 1 середнім радіусом r_0 і товщиною h збуджується радіально симетричним електричним полем. Для цього до її електричних виводів підводиться гармонічна електрична напруга $\Psi = \Psi_0 e^{-i\omega t}$, де i - уявна одиниця, ω - кругова частота. Радіальна симетрія електричного поля забезпечується нанесенням суцільних електродів на циліндричні поверхні кілець суцільної оболонки або на плоскі поверхні та електрично паралельне включення призми, із яких утворені кільця сегментованої оболонки.

Акустичний екран 2 виконаний у вигляді циліндричного тіла зовнішнім радіусом a_0 з акустично м'якою поверхнею ($\rho c = 0$). Його поздовжня вісь паралельна поздовжній вісі п'єзокерамічної оболонки і розміщена на відстані l_{00} від неї під кутом φ_{00} .

Внутрішнє і зовнішнє рідинні середовища з характеристиками відповідно $\rho_1 c_1$ та ρc , де ρ_1 і ρ – густини, а c_1 і c – швидкості поширення звуку в середовищах, є ідеальними акустичними середовищами.

Декартові і циліндричні системи координат вводяться таким чином, що їх вісі Z направлені вздовж поздовжніх вісей оболонки і екрана, а вісі X та x паралельні між собою або співпадають. Для отримання розрахункових співвідношень було проведено спільне рішення:

- хвильового рівняння для гармонічних коливань (рівняння Гельмгольца), що описує рух пружних середовищ всередині та ззовні випромінювача в циліндричних координатах (r, φ, z) :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + k_i^2 \Phi = 0, \quad (1)$$

де $\Phi = \Phi(r, \varphi, z)$ – потенціал швидкості гармонічного акустичного поля;

- диференціальних рівнянь електромеханічних коливань сегментованої циліндричної п'єзокерамічної оболонки:

$$\begin{aligned} (1 + \beta_k) \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial w}{\partial \varphi} - \beta \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} &= \alpha \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ -\frac{\partial u}{\partial \varphi} + \beta_k \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) - w + \frac{e_{33}}{C_{33}^E} r_0 E_\varphi^{(0)} + \frac{a}{h} q_r &= \alpha \gamma \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де u, w – відповідно тангенціальні і радіальні компоненти вектора зміщень; $C_{33}^E, \varepsilon_{33}^S$ (входить в коефіцієнт β), e_{33} і γ – відповідно модулі пружності при нульовій електричній напруженості, діелектрична проникливість при нульовій деформації, п'єзоконстанта і густина матеріалу оболонки.

Рівняння вимушеної електростатики, що відповідають електричним умовам задачі:

$$\vec{E} = -grad\Psi, div\vec{D} = 0, \quad (3)$$

де \vec{E}, \vec{D} – вектори напруженості та індукції електричного поля.

Оскільки п'єзокерамічна оболонка являє собою пружне тіло, у якого коливальна швидкість в будь якій точці поверхні залежить не тільки від акустичного тиску в цій точці, а й від тиску в інших точках поверхні оболонки, то визначення характеристик акустичного поля необхідно здійснювати, виходячи з умов спряження. Ці умови включають кінематичні і динамічні умови. Кінематичними умовами є рівність нормальних складових коливальних швидкостей оболонки і акустичного середовища. Динамічні умови відображують рівність нормальних складових тензора механічних напружень σ в п'єзокерамічній оболонці акустичному тиску, взятому з протилежним знаком. Виходячи з наведеного, граничні умови досліджуваної задачі слід сформулювати наступним чином:

- рівність швидкостей коливань частинок внутрішнього і зовнішнього середовищ і швидкості нормальних зміщень поверхонь оболонки :

$$-\frac{\partial \Phi_1}{\partial r} = \frac{\partial w}{\partial t}, |\varphi| \leq \pi; r = r_1 = r_0 - \frac{h}{2}; \quad (4)$$

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial r} = \frac{\partial w}{\partial t}, |\varphi| \leq \pi; r = r_2 = r_0 + \frac{h}{2}; \quad (5)$$

де Φ, Φ_1 – потенціали швидкостей акустичних полів у зовнішньому і внутрішньому середовищах перетворювача;

- рівність нормальних складових та напруг на поверхні оболонки

$$\sigma = q_r = -(p - p_1), |\varphi| \leq \pi, r = r_2, \quad (6)$$

де $p = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}$; $p_1 = \rho_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial t}$ – радіальні напруги від динамічного тиску.

По акустичному екрану перетворювача граничні умови, враховуючи акустичну м'якість екрану, визначаються рівнянням:

$$\Phi_1(a, \theta) = 0, a = a_0, 0 \leq |\theta| \leq \pi \quad (7)$$

де $\Phi_1(a, \theta)$ – акустичне поле у внутрішньому середовищі випромінювача, задане в локальних координатах (a, θ, z) , пов'язаних з акустичним екраном.

Крім умов спряження для розв'язку “наскрізної” задачі його випромінювання потрібно сформулювати і її електричні умови:

$$E_\varphi^0 = -\frac{\Psi_0 N}{2\pi r_0} \quad (8)$$

де N – кількість сегментів в кільцях оболонки, які жорстко склеєні і паралельно електрично включені між собою.

Представимо механічні та акустичні поля випромінювача з внутрішнім екраном у вигляді наступних розкладів:

$$\begin{aligned} U &= \sum_n U_n e^{in\varphi}; W = \sum_n W_n e^{in\varphi}; \\ \Phi_1(a, \theta) &= \sum_m [C_m J_m(k_1 a) + D_m N_m(k_1 a)] e^{im\theta}; \\ \Phi_1(r, \varphi) &= \sum_m \sum_n C_m J_{m-n} \left(k_1 l_{00} \right) e^{i(m-n)\varphi_{00}} e^{in\varphi} * [J_n(k_1 r) - \frac{J_n(k_1 a_0)}{N_m(k_1 a_0)} N_n(k_1 r)] \end{aligned} \quad (9)$$

де U_n та W_n невідомі коефіцієнти розкладів; $H_n^{(1)}(kr)$, $J_m(k_1 a)$ і $N_m(k_1 a)$ – традиційні позначення функцій Ханкеля, Бесселя і Неймана.; k і k_1 – хвильові числа відповідно зовнішнього та внутрішнього середовища.

Алгебраїзація функцій рівнянь (1-8) з урахуванням співвідношень (9) та теорем додавання для циліндричних хвильових функцій дозволяє на основі властивостей повноти та ортогональності кутових функцій $e^{in\varphi}$ на інтервалі $[0, 2\pi]$ одержати для визначення невідомих коефіцієнтів нескінченну систему лінійних алгебраїчних рівнянь у вигляді:

$$\frac{icW_n}{H_n^{(i)}(kr_2)} = A_n, n = -\infty, \infty;$$

$$W_n = \frac{1}{c_n} [\sum_m C_m J_{m-n}(k_1 l_{00}) e^{i(m-n)\varphi_{00}} \times \Delta_{nm}(k_1 r_1)], n = -\infty, \infty; \quad (10)$$

$$R_\nu W_\nu + \frac{\alpha}{h} i\omega [\rho A_\nu H_\nu^{(i)}(k r_2)] - \rho_1 \sum_m C_m J_{m-\nu}(k_1 l_{00}) \times e^{i(m-\nu)\varphi_{00}} \times \Delta_{m\nu}(k_1 r_1) = \frac{e_{33}}{c_{33}^E} \frac{\Psi_0 N}{4\pi^2} Q_\nu;$$

$$\text{де } Q_\nu = \int_0^{2\pi} e^{-i\nu\varphi_s} d\varphi_s = \begin{cases} 2\pi n \text{ при } \nu = 0; \\ 0 \text{ при } \nu \neq 0; \end{cases} \quad \nu = -\infty, 0, \infty;$$

$$R_n = \frac{\alpha^2 \gamma^2 \omega^4 - \alpha \gamma \omega^2 (1 + \beta n^2)(n^2 + 1) + \beta n^2 (n^2 - 1)^2}{\alpha \gamma \omega^2 - (1 + \beta) n^2};$$

$$\Delta_{mn}(k_1 r) = J_n(k_1 r) - \frac{J_m(k_1 a_0)}{N_m(k_1 a_0)} N_n(k_1 r); \text{ штрих означає похідну від функції.}$$

Чисельне рішення нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь (10) може бути здійснено методами редукції або послідовних наближень. Для цього систему (10) потрібно регуляризувати. Це може бути здійснено, наприклад, шляхом заміни невідомих A_n та C_m новими невідомими \widetilde{A}_n та \widetilde{C}_m по формулам:

$$\widetilde{A}_n = A_n H_n^{(i)'}(k r_1); \quad \widetilde{C}_m = C_m \frac{J_m'(k_1 r_1)}{N_m'(k_1 r_1)} \quad (11)$$

Кількість невідомих, які потрібно одержати в результаті редукції системи (10), визначається із умови забезпечення мінімальної похибки при побудові полів в часткових областях на їх межах. Всі члени виразів (10) мають ясну фізичну суть. Вільний член описує процес перетворення електричної енергії п'єзокерамічною оболонкою перетворювача в механічну на нульовій моді її коливань. Сума характеризує взаємодію оболонки та екрану у внутрішньому просторі перетворювача. В неї входить множник $J_{m-n}(k_1 l_{00})$, який залежить від відстані між екраном і внутрішньою поверхнею оболонки, і описує взаємодію між ними, обумовлену многократним обміном звуковими хвилями m-го та n-го порядків розсіювання. При зміні хвильової відстані $k_1 l_{00}$ цей множник змінюється. Відповідно змінюється і вплив взаємодії на формування акустичного поля у внутрішньому середовищі перетворювача. Крім того, присутні множники $\frac{J_m(k_1 a_0)}{N_m(k_1 a_0)}$, які визначають коефіцієнти дифракції звукових хвиль на м'якому циліндрі.

Наступні три розділи присвячені дослідженню властивостей фізичних полів та закономірностей їх, поведінки в залежності від конструктивних особливостей циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми екранами. Усі числові розрахунки виконувались для наступних числових значень параметрів та характеристик елементів конструкцій перетворювачів:

- для дослідження приймалися наступні склади п'єзокерамічного матеріалу: ЦТБС-3, ЦТС-19, ТБК-3;

- середні радіуси оболонок та їх товщини змінювались відповідно в діапазонах $r_o = 0,068 \div 0,12$ м та $h = 0,008 \div 0,012$ м;

- окружна поляризація перетворювачів забезпечувалась жорстким з'єднанням $N = 48$ призм, що складають оболонки;

- електрична напруга, якою збуджувались перетворювачі, становила $\psi_0 = 200$ В;

- відстань між поздовжніми вісями екрана і оболонки визначалась значеннями: $l_{00} = r_0 - \frac{h}{2} - a_0 - 0.003$ м; $2a_0$; 0.

розміри екранів приймали значення $a_0 = 0,2r_0$; $0.5r_0$; $0.9r_0$;

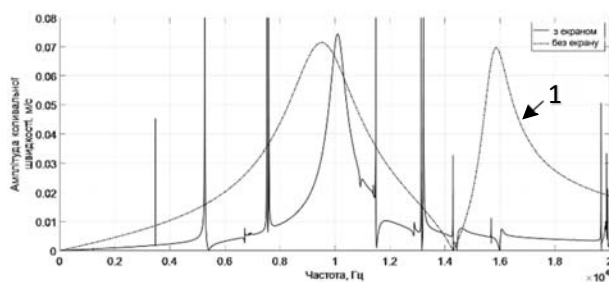
- внутрішні порожнини п'єзокерамічних оболонок перетворювачів вакуумувались ($\rho_s c_s = 0$), заповнювались повітрям при нормальному атмосферному тиску ($\rho_s c_s = 419,1$ кг/м²с) або рідинами з різними густиною та швидкістю звуку ($\rho_s c_s = 1,5 \cdot 10^6$ кг/м²с; $2,25 \cdot 10^6$ кг/м²с; $0,5 \cdot 10^6$ кг/м²с);

- аналіз наведено в частотному діапазоні $f = 0 \div 20000$ Гц.

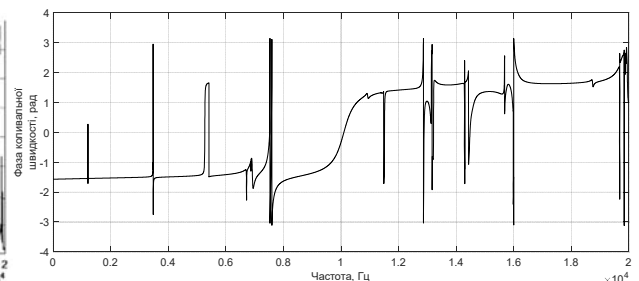
Другий розділ присвячено дослідженню властивостей механічних полів. В якості параметрів, що досліджувались, приймались амплітудні і фазові частотні залежності нормальної складової коливальної швидкості на зовнішній поверхні циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми екранами.

Частотні залежності коливальних швидкостей розраховувались в точках $(r_0 + \frac{h}{2}, 0)$ в залежності від розмірів екранів при однаковій найменшій відстані між поверхнями екрану і оболонки та значень відстані між вісями оболонок і екрану при однаковому розмірі екрану.

Деякі з результатів розрахунків представлені на рис.2-3. Їх аналіз свідчить про наступне. Введення до складу випромінювача внутрішнього екрану перетворює його в багатомодову мехнічну коливальну систему. Кількість заново генерованих мод коливань залежить як від розмірів екранів (рис.2а,б,в,г), так і відстані між вісями екрану та оболонки (рис.2 а,д,е).



а)



б)

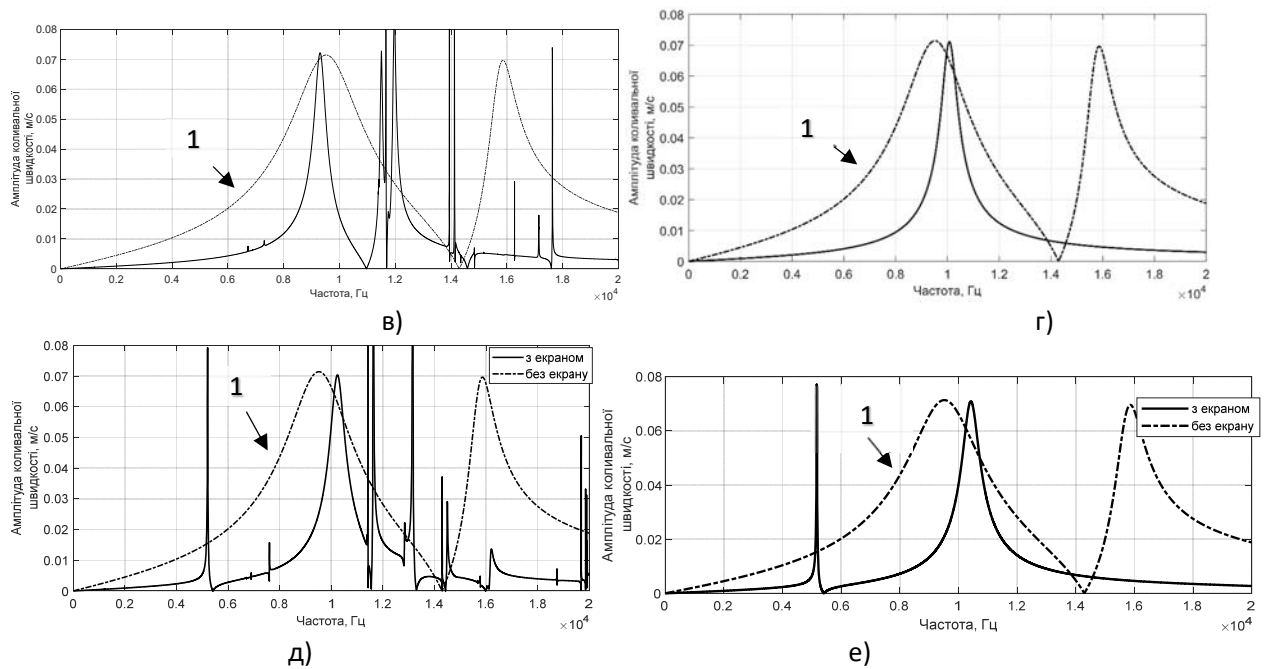


Рис. 2. Частотні залежності амплітуд (а,в,г,д,е) та фаз (б) коливальної швидкості екранованого випромінювача для розмірів екрану $a_0 \cong 0.2r_0$ (а,б); $a_0 \cong 0.5r_0$ (в); $a_0 \cong 0.9r_0$ (г) та відстані: $l_{00} = 2a_0$ (д); 0(е); $r_0 = h/2 = 0.2r_0 = 0.003$ м(а).

Аналіз графіків рис. 2 дозволяє встановити наступні закономірності. У відсутності екрану частотна залежність коливальної швидкості перетворювача являє собою двохрезонансну криву (кр.1). Її перший резонанс визначається власним резонансом п'єзокерамічної оболонки, другий є резонансом об'єму рідини у внутрішній порожнині оболонки. Введення до складу перетворювача акустично м'якого несиметрично розташованого циліндричного екрану повністю змінює описані вище частотні залежності амплітуд та фаз перетворювача. При цьому принципово важливу роль набувають розміри екрану та ступінь віддаленості його від центру перетворювача. При малих розмірах екрану ($a_0 \cong 0.2r_0$) та максимально допустимому віддаленні його від центру перетворювача (рис.2а,б) спектр власних частот перетворювача суттєво збагачується та розширюється як в область низьких, так і високих частот. Про те, що всі ці частоти відносяться до резонансних, свідчить фазочастотна характеристика (рис.2б) перетворювача. Особливо цікавим для практики є генерування механічних резонансів перетворювача без зміни його розмірів в низькочастотній області із значеннями частот, в (2-8) раз меншими значення власної резонансної частоти п'єзокерамічної оболонки.

При цьому амплітуди коливальних швидкостей перетворювача на цих заново генерованих резонансах рівні, а в деяких випадках перевищують амплітуду швидкості коливань на власному резонансі оболонки, хоча їх резонансні області значно звужуються у порівнянні з останньою.

Збільшення розмірів екрану ($a_0 \cong 0.5r_0$) та пов'язане з ним зменшення ступеню порушення радіальної симетрії перетворювача супроводжується різким зменшенням кількості заново генерованих механічних резонансів в низькочастотній області та збільшенням їх кількості в резонансній та високочастотній областях (рис.2.в). При подальшому збільшенні розмірів екрану ($a_0 \cong 0.9r_0$) перетворювач з внутрішнім екраном (рис.2г) втрачає спроможність генерування додаткових механічних резонансів, а його частотні характеристики наближаються до частотних характеристик п'єзокерамічної оболонки перетворювача в вакуумі.

Подібні ж закономірності змін, але з іншими кількісними показниками встановлені для частотних залежностей амплітуд та фаз механічного поля випромінювача з внутрішнім екраном при:

- зміні складів п'єзокераміки (розглянуті склади ЦТС-19, ЦТБС-3, ТБК-3);
- зміні типу заповнюючої рідини (розглянуті вода, гас, гліцерин);
- зміні конструктивних характеристик випромінювача (діаметру та товщини оболонки).

Для встановлення фізичних причин появи таких складних частотних залежностей амплітуд та фаз механічних полів розглянемо частотні залежності мод коливальної швидкості екранованого випромінювача (рис.3). Їх аналіз показує, що має місце генерація двох типів мод коливальних швидкостей: складові коливань нульової моди, пов'язані із стоячими хвилями, утвореними нею в замкнутих об'ємах кінцевих розмірів, якими є внутрішні об'єми випромінювача, і коливання мод, наступних за нульовою, обумовлених порушенням радіальної симетрії побудови випромінювача з екраном при збереженні радіальної симетрії його електричного навантаження.

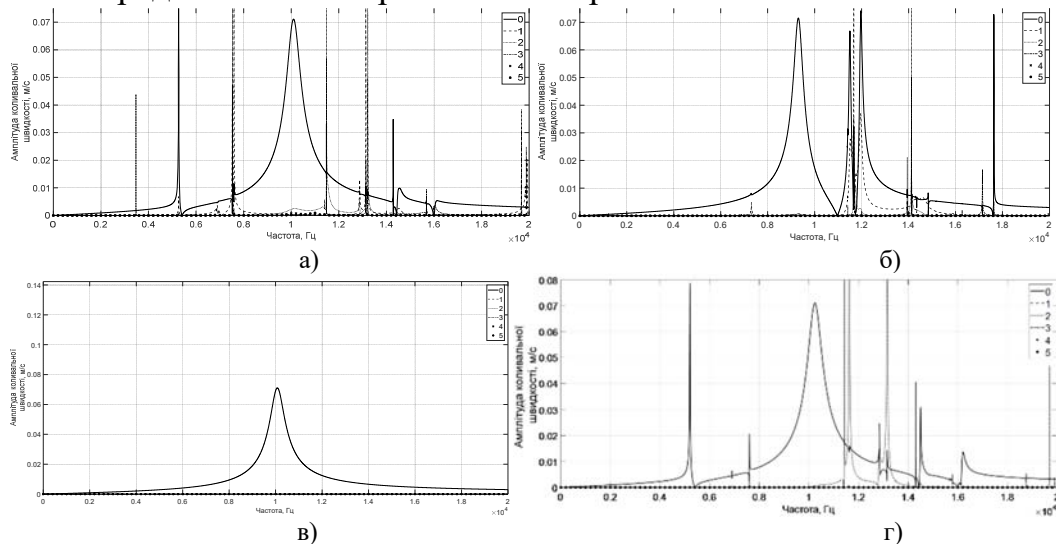


Рис.3 Частотні залежності амплітуд мод коливальних швидкостей екранованого випромінювача при $a_0 \cong 0.2r_0$ (а); $a_0 \cong 0.5r_0$ (б); $a_0 \cong 0.9r_0$ (в) та відстані $l_{00} = r_0 - \frac{h}{2} - a_0 - 0.003\text{м}$ (а, б, в) та $2a_0$ (г).

При малих розмірах екрану ($a_0 \sim 0.2r_0$) та великих відстанях l_{00} (рис.3а) кількість заново генерованих мод найбільша, амплітуди їх коливальних швидкостей однакові або значно перевищують амплітуду швидкості нульової моди. При цьому більшість механічних резонансів, що генеруються цими модами, зосереджується у низькочастотній області, а значення їх частот в $(3 \div 5)$ раз менше основної резонансної частоти п'єзокерамічної оболонки у вакуумі. Нульова мода зберігає незмінною свою резонансну частоту, але змінює свої частотні залежності. На цій залежності в області низьких частот з'являються нові додаткові резонансні викиди. Ці викиди виникають в області частот, для яких розмір зазору становить близько 0.25 відповідної їм довжини хвилі у середовищі, що наповнює внутрішню порожнину перетворювача. Він зумовлений взаємодією прямих хвиль, випромінених в області цих частот внутрішньою поверхнею п'єзокерамічної оболонки перетворювача, і хвиль, відбитих на цих частотах внутрішнім екраном. Збільшення розмірів екрану ($a_0 \cong 0.5r_0$) і зменшення відстані l_{00} ($\sim 2a_0$) при $a_0 = 0.2r_0$ суттєво (рис.3 б,г) змінюють встановлені вище закономірності. Моди, формуючі механічні резонанси в низькочастотній області, зникають. Додаткові механічні резонанси концентруються в резонансній (8кГц-14кГц) та високочастотній (14кГц-20кГц) областях, а амплітуди їх коливальних швидкостей зрівнюються з амплітудою швидкості нульової моди. Окрім механічних резонансів нульової моди коливань в резонансній та високочастотній областях виникають механічні резонанси, обумовлені заново генерованими модами коливань, наступними за нульовою.

Подальше збільшення діаметру акустичного екрану до $a_0 \cong 0.9r_0$ супроводжується (рис 3.в) втратою як додаткових резонансів нульової моди п'єзокерамічної оболонки, так і генеруванням нових наступних за нульовою більш високих мод коливань. Саме наведені вище результати по частотним залежностям коливальних швидкостей модових складових механічного поля визначають і частотну залежність повної коливальної швидкості перетворювача (рис.2).

Третій розділ присвячено дослідженню властивостей акустичних полів циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми екранами. В якості параметрів, що досліджувалися, приймалися амплітудні та фазові частотні залежності значень звукового тиску на поверхні перетворювачів та кутові залежності для ближнього і дальнього поля.

Аналіз частотних і фазових залежностей амплітуд акустичного тиску при зміні розмірів a_0 акустичного екрану і сталому значенні відстані (0,003м) між поверхнями п'єзокерамічної оболонки та екрану свідчить про таке. Несиметричне розміщення екрану у внутрішньому об'ємі п'єзокерамічної оболонки обумовлює появу значної кількості амплітудних сплесків (рис. 4). Більша частина цих сплесків має амплітуду, величина якої порівняна, або перевищує (причому, значно) амплітуду тиску на власному резонансі

п'єзокерамічної оболонки. Кількість таких амплітудних сплесків найбільша при максимальних значеннях l_{00} і малому значенні a_0 , тобто при максимальній втраті радіальної симетрії побудови вимірювача. Цікавим є те, що саме при малих a_0 екранований випромінювач генерує амплітудні сплески тиску в низькочастотному діапазоні. Частоти цих сплесків в (1,3 -6) разів нижчі ніж власна частота п'єзокерамічної оболонки. При цьому розміри екранованого випромінювача залишилися незмінними. Аналіз частотнофазових залежностей в цій області (рис. 4г,д) показує, що не всі з цих амплітудних сплесків є резонансними.

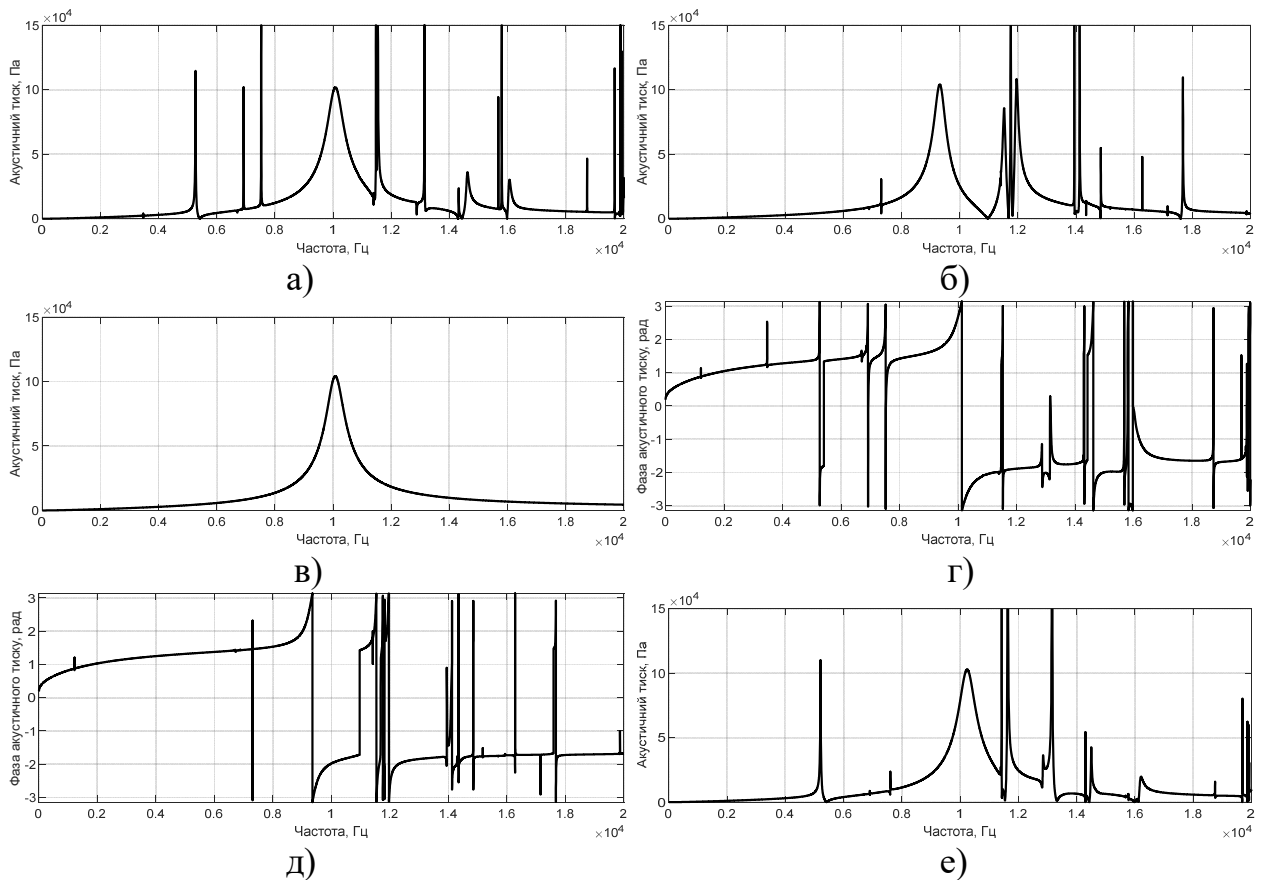


Рис. 4 Частотні залежності амплітуд (а,б,в,е) акустичного тиску та фаз (г,д) на поверхні екранованого випромінювача при $a_0 = 0,2r_0$ (а,г); $0,5r_0$ (б,д); $0,9r_0$ (в) при $l_{00} = r_0 - \frac{h}{2} - a_0 - 0.003\text{м}$ та $l_{00} = 2a_0$ (е).

Аналіз частотних залежностей амплітуд і фаз акустичного тиску при зміні відстані l_{00} свідчить (рис. 4) про резонансний характер цих залежностей. В цілому при різних величинах l_{00} розміщення внутрішнього екрану сталих розмірів, але на різних відстанях від центру п'єзокерамічної оболонки забезпечує генерацію багатьох резонансних сплесків акустичного тиску. Але діапазони частот, в яких вони розміщуються, і їх кількість в цих діапазонах визначається

саме значеннями величини l_{00} . Найбільша кількість резонансних сплесків амплітуд акустичного тиску і наявність їх у всіх досліджуваних частотних областях – низькочастотній, резонансній і високочастотній спостерігається при максимальних значеннях відстані l_{00} (рис. 4 а). Причому, як вже відзначалося, особливе практичне значення набуває той факт, що без збільшення габаритних розмірів випромінювачів і невеликих розмірах внутрішніх екранів саме в низькочастотній області генерується значна кількість частот резонансного випромінювання з амплітудами акустичного тиску, більшими або значно більшими порівняно з амплітудами на власній частоті п'єзокерамічної оболонки випромінювача. Це створює можливості суттєвого підвищення ефективності випромінювачів. Фізичними причинами створення таких можливостей є, по-перше, значне порушення радіальної симетрії побудови екранного випромінювача і, по-друге, появи у внутрішньому просторі п'єзокерамічної оболонки стоячих хвиль, обумовлених наявністю в ньому акустичного екрану. Подібні залежності, але з іншими кількісними значеннями встановлені і для амплітудних та фазових частотних залежностей акустичних полів екранованого випромінювача при змінах: складів п'єзокераміки; рідин у внутрішній порожнині; розмірів випромінювачів.

Для підтвердження відповідності розрахункової моделі, реальним особливостям випромінювача з внутрішнім екраном були проведені експериментальні дослідження деяких параметрів такого випромінювача та порівняння їх з даними, отриманими у ході розрахунків. Макет являє собою циліндричний п'єзокерамічний випромінювач, активні елементи якого мають окружну поляризацію, склад п'єзокераміки ТБК-3, геометричні розміри: радіус $r_1 = 150 \text{ мм}$ висоту $H = 100 \text{ мм}$ та товщину $h = 15 \text{ мм}$. Експеримент був проведений з декількома акустичними екранами розмірами $0.5r_0$ та $0.2 r_0$. При цьому відстань між екраном і стінкою оболонки становила 3 мм. Електричне збудження здійснювалося напругою $U = 200 \text{ В}$ на частотах $f = 4 \div 6 \text{ кГц}$. Зображення макету та лабораторного стенду та приладів вимірювання представлені на рис.5. В якості параметру були прийняті нормовані кутові залежності акустичного тиску.

Експеримент був проведений в ДП «КНДІ гідроприладів» у заглушеному акустичному басейні. Вимірювання проводились згідно з ОСТ5.8361-86. Кількість проведених незалежних вимірювань становить 10. Середньоквадратична похибка вимірювань кутових залежностей склала 0,07 при вірогідності 0,95. Результати експерименту та розрахунків наведені на рис.6.

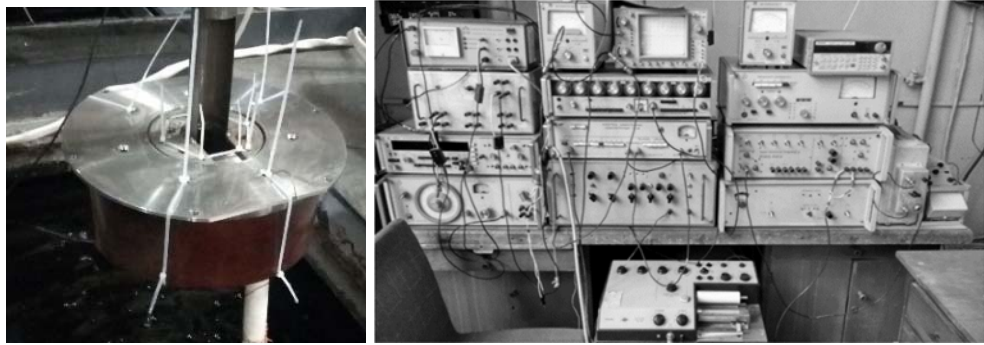


Рис. 5. Циліндричний випромінювач з внутрішнім екраном (а) та вимірювальний стенд (б)

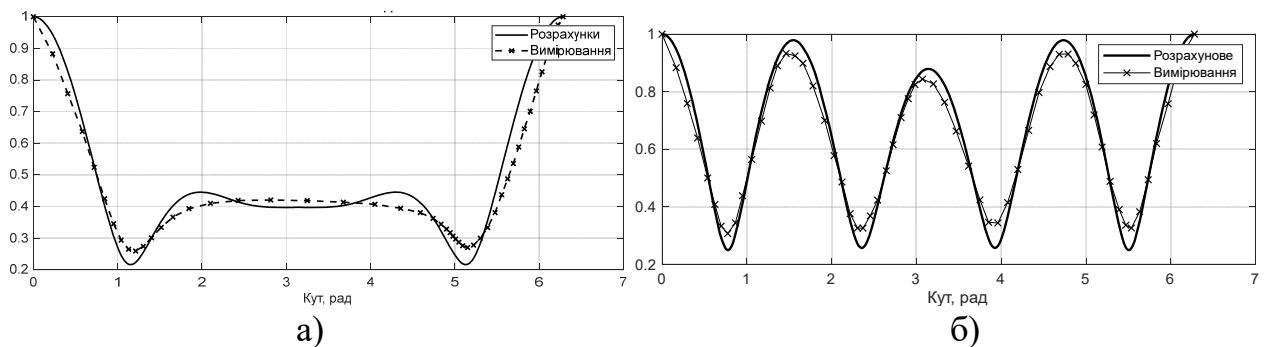


Рис. 6 Кутові залежності амплітуди акустичного тиску випромінювача з екраном радіусом $a_0=0.2r_0$ на частоті $f = 4$ кГц (а); та радіусом $a_0=0.5r_0$ на частоті $f = 6$ кГц (б)

Виходячи із наведених даних можливо зробити висновок, що запропонована розрахункова модель може бути використана при проектуванні циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішнім екраном.

Четвертий розділ присвячено дослідженню електричних полів циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми екранами. Виходячи зі схем електричного заміщення перетворювача в трактах випромінювання сигналів, які використовуються при проектуванні цих трактів, в якості досліджуваних характеристик електричного поля були прийняті наступні: повний електричний струм, його активна і реактивна складові, що подаються від генератора на перетворювач при його збудженні; повний вхідний електричний опір перетворювача та його активна та реактивна складові.

Повний струм в зовнішньому ланцюзі випромінювача з внутрішнім екраном та окружною поляризацією визначається співвідношенням:

$$I = -i\omega S_{el} \left\{ -\epsilon_{33}^s \frac{\Psi_0 N^2}{2\pi r_0} + \frac{e_{33}}{r_0} \sum_{j=1}^N \left[\sum_n i n U_n e^{in \frac{2\pi j}{N}} + \sum_n W_n e^{in \frac{2\pi j}{N}} \right] \right\}$$

Де S_{el} площа електродів.

Вхідний електричний імпеданс випромінювача з внутрішнім екраном визначається законом Ома.

Результати деяких розрахунків представлено на рис.7-8.

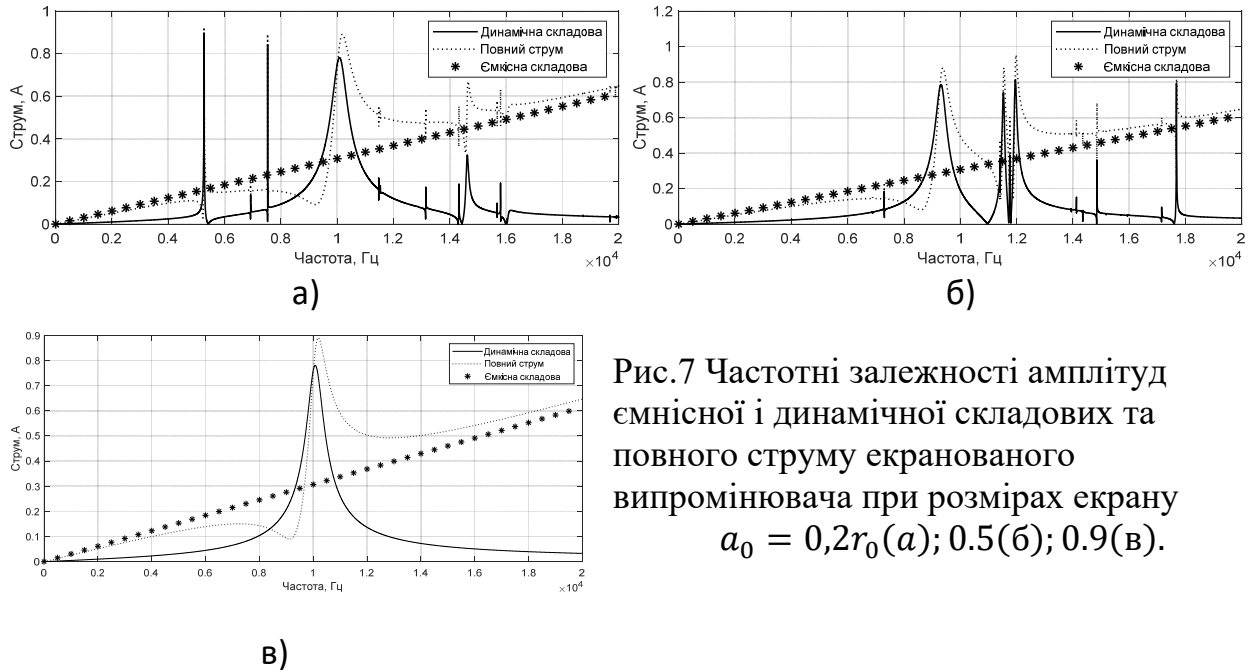


Рис.7 Частотні залежності амплітуд ємнісної і динамічної складових та повного струму екранованого випромінювача при розмірах екрану $a_0 = 0,2r_0(a); 0,5(b); 0,9(v)$.

Їх аналіз свідчить про наступне.

При малих ($a_0 = 0,2r_0$) розмірах екрану (рис.7а) і утвореним завдяки цьому значним порушенням радіальної симетрії побудови випромінювача має місце різна поведінка амплітуд струму в різних частотних діапазонах. В низькочастотній дорезонансній області (0-8кГц) виникає кілька значних вузькосмугових сплесків, амплітуди яких перевищують амплітуду струму на резонансній частоті п'єзокерамічної оболонки. Частоти цих сплесків в 2 і менше разів нижчі від власної частоти оболонки. Резонансна область (8кГц-14кГц) характеризується резонансною областю п'єзокерамічної оболонки і появою кількох дуже вузькополосних сплесків. Їх амплітуди менші ніж амплітуда струму на власному резонансі оболонки, а частоти цих сплесків розміщуються вище частоти оболонки. В високочастотній післярезонансній області (вище 14кГц) амплітуда струму значно зменшується і виникають провали амплітуд до нуля. Збільшення розмірів екрану ($a_0 = 0,5r_0$) обумовлює суттєві зміни в частотних залежностях амплітуд динамічного струму (рис.7б). В низькочастотній дорезонансній області резонансні сплески амплітуд зникають і має місце поступове зростання амплітуди динамічного струму, близьке до прямопропорційного. Резонансна область зазнає значних змін. Власні частота п'єзокерамічної оболонки знижується, а її резонансна область зменшується. В цій області з'являються нові резонансні сплески. Їх амплітуди порівняні з амплітудою струму на власній частоті п'єзокерамічної оболонки, а резонансні області більш вузькі порівняно з резонансною областю оболонки, але значно більші ніж такі резонансні області при малих розмірах екранів (рис.7а). В

високочастотній післярезонансній області амплітуда струму значно (більш ніж на порядок) знижується. В той же час на окремих частотах виникають дуже вузькосмугові сплески амплітуд струму різної величини. Розміщення у внутрішньому об'ємі оболонки випромінювача циліндричного екрану великих розмірів ($a_0 = 0,9r_0$) принципово (рис.7в) змінює описані вище закономірності в поведінці динамічного струму. Багаторезонансність у всіх частотних діапазонах зникає. Динамічний струм має лише один резонансний сплеск на частоті власного резонансу п'єзокерамічної оболонки випромінювача. В діапазоні низьких частот при середніх і великих розмірах внутрішнього екрану закономірностями поведінки повного струму керує його ємнісна складова. В резонансній області повний струм майже повністю, за виключенням верхніх частот цього діапазону, визначається лише динамічним струмом.

І, нарешті, в області високих частот при всіх розмірах внутрішніх екранів закономірності поведінки повного струму продиктовані його ємнісною складовою.

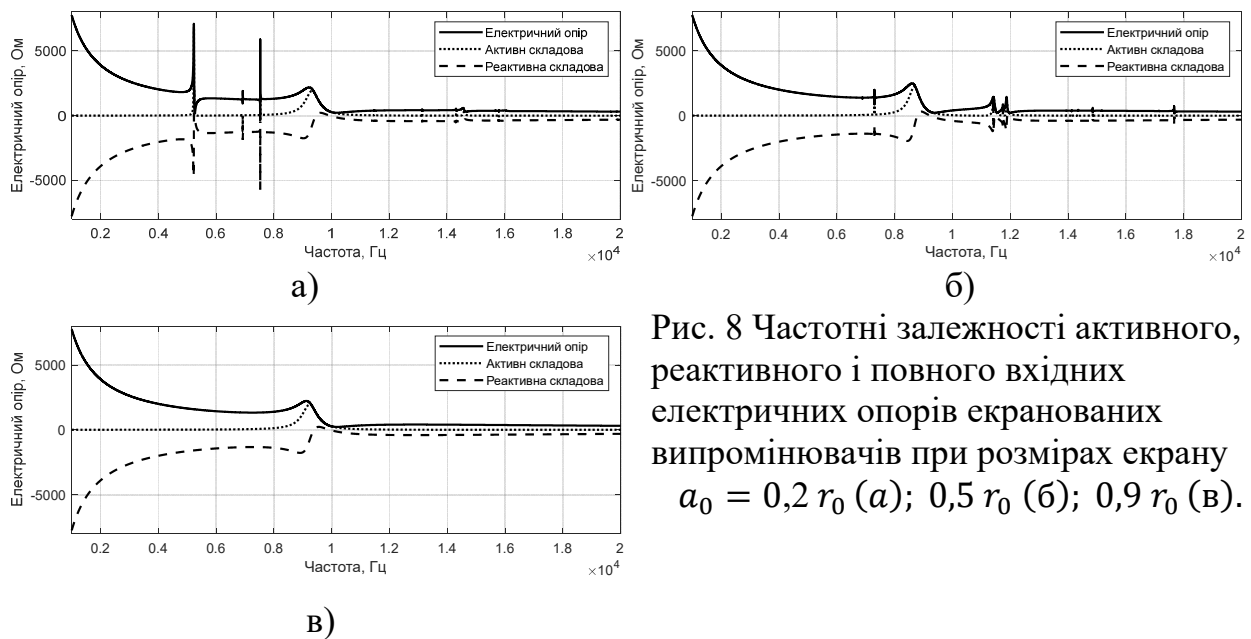


Рис. 8 Частотні залежності активного, реактивного і повного входних електричних опорів екранованих випромінювачів при розмірах екрану $a_0 = 0,2 r_0$ (а); $0,5 r_0$ (б); $0,9 r_0$ (в).

При малих значеннях a_0 (рис. 8а) низькочастотна область екранованого випромінювача характеризується великими значеннями повного входного електричного опору і зворотно пропорційним його зменшенням із збільшенням частоти збудження. В той же час слід звернути увагу на появу: по-перше, кількох частот, де цей опір набуває малих значень, і, по-друге, двох діапазонів частот розміром в (1,5 -1,8) октави з незмінним і відносно невеликим входним опором. Резонансна область при таких величинах a_0 має два частотні діапазони з різко відмінними (більше ніж на порядок), але стабільними по частоті в цих піддіапазонах значеннями повного входного електричного опору. Такі особливості частотної поведінки $|Z_{вх}|$ значно покращують можливість

узгодження генератора з випромінювачем. Збільшення розмірів екрану до середніх значень ($a_0 \approx 0,5r_0$) суттєво змінює частотні залежності вхідного електричного опору випромінювача (рис. 8б).

Аналіз частотної поведінки активних складових повного опору показує його малі значення при екранах всіх розмірів., за винятком двох особливостей. Перша полягає в тому, що в резонансній області має місце резонансний всплеск активного опору, частота якого збільшується при збільшенні розмірів екрану. Друга особливість свідчить про те, що активний опір в низькочастотній області нижчий, ніж у високочастотній.

Аналіз частотних залежностей реактивного електричного опору свідчить про те, що саме він визначає частотну поведінку повного опору. Майже у всьому досліджуваному частотному діапазоні при всіх розмірах екранів реактивний опір має ємнісний характер. Виключення становлять вузькі частотні діапазони в низькочастотних і резонансних областях при малих і середніх розмірах екранів (рис. 8 а, б). В цих діапазонах ємнісний характер опору змінюється на індуктивний.

Подібні залежності були встановлені і для екранованих випромінювачів з різними складами п'єзокераміки (ЦТС-19, ЦТБС-3, ТБК-3), з різними видами заповнюючих рідин (вода, гліцерин, гас) і різними розмірами конструкцій випромінювачів.

Наведені результати досліджень свідчать про те, що змінюючи характер розміщення одного і того ж екрану у внутрішньому об'ємі п'єзокерамічної оболонки випромінювача, складу п'єзокераміки, вид заповнюючої рідини і конструктивні характеристики випромінювачів можливо в певних межах керувати ефективністю випромінювання перетворювачів з внутрішніми екранами без змін габаритних розмірів електроакустичних частин локаційних пристроїв.

ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційної роботи виглядають наступним чином.

1. В рамках задач стаціонарної гідроелектропружності запропоновані розрахункові моделі кругових циліндричних гідроакустичних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішніми акустичними екранами, які дозволяють одержати кількісні значення параметрів випромінювачів з урахуванням взаємодії основних фізичних процесів, що обумовлюють випромінювання звуку, та конструктивних характеристик випромінювачів.

2. Вперше одержані аналітичні співвідношення для визначення електричних, механічних та акустичних полів циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішнім асиметрично розміщеним акустично м'яким екраном. Ці співвідношення є результатом розв'язку методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях наскрізних задач випромінювання звуку

досліджуваними випромінювачами з урахуванням зв'язаності електричних, механічних і акустичних полів при перетворенні енергії, зв'язаності акустичних полів п'єзокерамічної оболонки і екрану при формуванні акустичного поля випромінювача і зв'язаності процесів перетворення енергії та її формування в оточуючих середовищах.

3. Вперше з єдиних методичних позицій систематизовано досліджені властивості, якісні та кількісні закономірності змін електричних, механічних та акустичних полів випромінювачів з внутрішніми екранами в залежності від розмірів оболонок та екранів, місця розміщення екранів, складів та типу поляризації п'єзокерамічних оболонок та фізичних характеристик рідини у внутрішньому об'ємі випромінювачів.

4. Систематизовані дослідження фізичних властивостей полів випромінювачів з внутрішніми екранами дозволили вперше встановити:

в частині механічного поля: набуття властивості багатомодовості коливань. Ця властивість обумовлена двома фізичними факторами появою стоячих хвиль нульової моди коливань п'єзокерамічної оболонки випромінювача у його внутрішньому об'ємі при радіально симетричному електричному збудженні оболонки і появою наступних за нульовою мод коливань цієї оболонки внаслідок втрати випромінювачем з екраном радіальної симетрії його побудови, а відтак, і акустичного навантаження оболонки випромінювача та ефективного перерозподілу енергії нульової моди, на якій енергія електричного поля оболонки «закачується» в її механічне поле, між всіма заново генерованими модами;

в частині акустичного поля: збагачення спектру власних частот екранованого випромінювача та значне розширення його спектру в область низьких частот без зміни розмірів випромінювача. Визначено, що при цьому основний вклад вносять власні резонансні частоти внутрішнього об'єму випромінювача, збуджені нульовою модою коливань його п'єзокерамічної оболонки. Низькочастотні резонанси випромінювача мають частоти в $5\div 7$ разів менші від власної частоти його п'єзокерамічної оболонки;

в частині електричного поля: закономірності змін динамічної складової та повного електричного струму екранованого випромінювача в різних частотних діапазонах та управління повним струмом в цих діапазонах його ємнісною або динамічною складовими; закономірності частотних залежностей активного, реактивного та повного входних електричних опорів випромінювача, визначення умов, при яких активний опір приймає від'ємні значення, а реактивний змінює ємнісний характер на індуктивний.

5. Експериментальним шляхом підтверджена адекватність запропонованих розрахункових моделей та отриманих чисельних результатів реальним циліндричним п'єзокерамічним випромінювачам з внутрішніми екранами.

6. Отримані теоретичні результати мають практичне значення. Воно включає:

широкі можливості пошуку при виконанні проектних робіт раціональних схем побудови конструкцій екранованих випромінювачів в залежності від висунутих до них вимог завдяки встановленню аналітичних залежностей між параметрами фізичних полів випромінювачів і характеристиками конструкцій випромінювачів;

можливості використання ефективного резонансного випромінювання сигналів на значно нижчих порівняно з резонансною частотою п'єзокерамічної оболонки випромінювача без зміни розмірів останнього;

визначення умов ефективного узгодження екранованих випромінювачів з електронними генераторами, що збуджують їх.

Результати дисертації впроваджені в Державному підприємстві «Київський НДІ гідропріладів», що підтверджено відповідним актом.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лейко А. Г., Святненко А. О., Про фізичні поля плоских гідроакустичних антен, утворених з циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з жорсткими екранами у внутрішній порожнині, *Електроника и связь*. 2016. №6. С.44-50. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі (IndexCopernicus)*.
2. Лейко А. Г., Святненко А. О. Фізичні поля плоских гідроакустичних антен, утворених на основі циліндричних перетворювачів з внутрішніми екранами. *Електроника и связь*. 2017. №2. С.66-72. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі (Index Copernicus)*
3. Лейко А. Г., Кандрачук И.В., Святненко А.О. Особенности электромеханоакустического преобразования энергии цилиндрическими пьезокерамическими излучателями с внутренними экранами в составе плоских систем. *Приборы и методы измерений*. 2018. №9(1).С.85-95. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі (Web of Science)*
4. Дерепя А.В., Аверичев И.В., Лейко А.Г., Кизима Д.М., Святненко А.О. Свойства цилиндрических гидроакустических преобразователей с внутренними податливыми экранами. *Озброєння та військова техніка*. №4. С.40-46, 2018. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі, проведенні розрахунків параметрів та їх аналіз.*
5. Дерепя А.В., Лейко О.Г., Дрозденко О.І., Святненко А.О. Механічна міцність гідроакустичних циліндричних випромінювачів з нутрішніми екранами. *Озброєння та військова техніка*. №3, 2019. С.110-116. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі, проведенні розрахунків параметрів та їх аналіз.*

6. Активна система «Гідроакустична станція-надводний корабель» з лінійними антенами змінної глибини: пат . 108015 Україна: МПК(2016.01) G01S 7/52, G01S 15/66, G21H3/00, B06B 1/00 H01Q 21/00. № 201600521; заявл. 22.01.16; опубл. 24.06.16, Бюл. № 12. 9 с *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень, моделюванні та розробці опису винаходу.*
7. Система «Гідроакустична станція-надводний корабель» з розділеними активною та пасивною антенами змінної глибини: пат . 108798 Україна: МПК(2016.01) G01S 7/52, G01S 15/66, G21H3/00, B06B 1/00 H01Q21/00. № 201602054; заявл. 02.03.16; опубл. 25.07.16, Бюл. № 14. 11 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень, моделюванні та розробці опису винаходу.*
8. Нижник О. І., Гладкіх Н. Д., Маслов Д. С., Гусак З. Т., Старовойт Я. І., Святненко А. О. Станція пошуку плавців-диверсантів. Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки: тези доповідей на VI науково-технічній конференції, м. Київ, 15-18 грудня 2015року. С.406-407. *Внесок здобувача полягає в проведенні конструктивних розрахунків.*
9. Святненко А. О. О физических полях плоских систем, образованных из цилиндрических пьезокерамических преобразователей с внутренними экраном: Акустичний симпозіум "КОНСОНАНС 2017":збірник праць, м. Київ, 2-3 жовтня 2017. С. 130-133.
10. Святненко А. О. Фізичні поля циліндричного п'єзокерамічного випромінювача з внутрішнім м'яким екраном. XI міжнародна науково – технічна конференція молодих вчених «Електроніка 2018»: збірник статей, м. Київ, 3-5 квітня 2018 року. С.31-37.

АНОТАЦІЯ

Святненко А.О. Циліндричні п'єзокерамічні випромінювачі з внутрішніми екранами. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.08 - прикладна акустика та звукотехніка. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена розробці теоретичних засад розрахунків та проектування циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з внутрішнім екраном з урахуванням взаємодії електричних, механічних та акустичних полів випромінювачів та практичної реалізації цих засад. Розроблені методи

дозволяють враховувати вплив конструктивних особливостей перетворювачів на фізичні поля, утворювані випромінювачами в робочому стані.

Автором проведено аналіз конструктивних особливостей побудови випромінювачей та їх вплив на розрахункові параметри розрахунку циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів з внутрішнім екраном. До них відноситься : склад п'єзокераміки, з якого виготовлені активні елементи циліндричного п'єзокерамічного перетворювача з внутрішнім екраном; вид поляризації; фізичні розміри оболонки та екрану перетворювача; фізичні характеристики заповнюючої рідини. Відповідно до наведених конструктивних елементів створена розрахункова модель циліндричного п'єзокерамічного випромінювача з внутрішнім екраном, обрано метод, вирішені задачі визначення фізичних полів, що взаємодіють під час роботи перетворювача.

На базі створеної моделі при використанні методу зв'язних полів в багатозв'язних областях шляхом розв'язку наскрізних задач випромінювання гідроакустичних сигналів циліндричним п'єзокерамічним перетворювачем, автором отримані аналітичні співвідношення для опису акустичних, механічних, електричних полів циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів з внутрішнім екраном. Основна увага приділена процесам: перетворення електричної енергії в механічну, а механічної в акустичну; взаємодії через акустичне поле п'єзокерамічної оболонки і внутрішнього екрану випромінювача, взаємодії процесів перетворення енергії і її випромінювання в оточуюче середовище. Досліджено вплив конструктивних характеристик випромінювача на його фізичні поля.

Ключові слова: циліндричний п'єзокерамічний перетворювач, акустичний екран, фізичні поля, випромінювання гідроакустичних сигналів, , конструктивні особливості.

АННОТАЦИЯ

Святненко А.О. Цилиндрические пьезокерамические излучатели с внутренними экранами. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.08 - прикладная акустика и звукотехника. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена разработке теоретических основ расчетов и проектирования цилиндрических пьезокерамических излучателей с внутренним экраном с учетом взаимодействий электрических, механических и акустических полей излучателей и практической реализации этих принципов. Разработанные

методы позволяют учитывать влияние конструктивных особенностей преобразователей на физические поля, которые образуются излучателями в рабочем состоянии.

Автором проведен анализ конструктивных особенностей построения излучателя и их влияние на расчетные параметры цилиндрических пьезокерамических преобразователей с внутренним экраном. К ним относятся: состав пьезокерамики, из которого изготовлены активные элементы цилиндрического пьезокерамического преобразователя с внутренним экраном, вид поляризации, физические размеры оболочки и экрана преобразователя, физические характеристики заполняющей жидкости. Согласно приведенным конструктивным элементам создана расчетная модель цилиндрического пьезокерамического излучателя с внутренним экраном, выбран метод, решены задачи определения физических полей, взаимодействующих при работе преобразователя.

На базе созданной модели при использовании метода связанных полей в многосвязных областях путем решения сквозных задач излучения гидроакустических сигналов цилиндрическим пьезокерамическим преобразователем, автором получены аналитические соотношения для описания акустических, механических, электрических полей цилиндрических пьезокерамических преобразователей с внутренним экраном. Основное внимание уделено процессам: преобразование электрической энергии в механическую, а механической в акустическую; взаимодействия через акустическое поле пьезокерамической оболочки и внутреннего экрана излучателя, взаимодействия процессов преобразования энергии и ее излучения в окружающую среду. Исследовано влияние конструктивных характеристик излучателя на его физические поля.

Ключевые слова: цилиндрический пьезокерамический преобразователь, акустический экран, физические поля, излучения гидроакустических сигналов,, конструктивные особенности.

SUMMARY

Sviatnenko A.O. Cylindrical piezoceramic transducers with internal baffles.

- On the rights of the manuscript.

Dissertation for Candidate of Science Degree in the specialty 05.09.08 - Applied Acoustics and Audio Engineering. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", MES of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to the development of theoretical principles of calculations and design of cylindrical piezoceramic emitters with an internal baffle, taking into account the interactions of electric, mechanical and acoustic fields of emitters and the practical implementation of these principles. The developed methods

allow to take into account the influence of design features of transducers on physical fields formed by emitters in working condition.

The author analyzes the structural features of the emitter construction and their influence on the calculation parameters of cylindrical piezoelectric transducers with the inner baffel. These include: the composition of the piezoceramics, which are made of active elements of a cylindrical piezoceramic converter with an inner baffel, the type of polarization, the physical dimensions of the shell and the baffel of the converter, the physical characteristics of the filling fluid. In accordance with the given structural elements, a computational model of a cylindrical piezoceramic emitter with an internal baffel was created, a method was chosen, and the problems of determining the physical fields interacting during the converter operation were solved.

On the basis of the created model when using the method of connected fields in multi-connected regions by solving end-to-end problems of radiation of hydroacoustic signals by a cylindrical piezoceramic converter, the author obtained analytical relations for the description of acoustic, mechanical, electric fields of cylindrical transducers baffel. Much attention is paid to the processes: the conversion of electrical energy into mechanical, and mechanical into acoustic; interaction through the acoustic field of the piezoceramic shell and the transducer inner baffel, the interaction of energy conversion processes and their radiation into the environment. The influence of the design characteristics of the emitter on its physical fields is investigated.

Keywords: cylindrical piezoceramic converter, acoustic baffel, physical fields, radiation of acoustic signals,, design features.